

矽卡岩岩浆对中国北方某些矽卡岩型矿床形成的制约——来自包裹体激光拉曼分析证据*

赵劲松^{1,2} 赵斌^{1,2**} 李建威² 许德如¹ 何谋春² 郑建平²

ZHAO JinSong^{1,2}, ZHAO Bin^{1,2}, LI JianWei², XU DeRu¹, HE MouChun² and ZHENG JianPing²

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2013-05-14 收稿, 2013-12-16 改回.

Zhao JS, Zhao B, Li JW, Xu DR, He MC and Zheng JP. 2015. Magma control of magmatic skarn to the formation of some deposits of skarn type: Evidence from Laser Raman analyses of inclusions in minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4):1079–1088

Abstract This paper will report Raman analytical results of twenty-three inclusions in garnets, pyroxenes and dolomite or calcite from 9 deposits including Han-Xing iron deposits, Mengku iron deposit and Yangjiazhangzi molybdenum deposit in North China. The purpose of this study is to confirm whether these mineralized skarn minerals contain melt inclusions and fluid-melt inclusions and to obtain the information about their phase state characteristics and phase compositions as well as their distribution situations (local, accidental) and scales (widespread or common). Laser Raman analysis results showed that the all studied skarns contain melt inclusions and/or fluid-melt inclusions, they are direct evidence of magmatic skarns. Combined geological background, thermometry researches for inclusions in minerals of magma-genetic skarns from other areas of China and Laser Raman analysis results of present paper, the origin and formation mechanism of investigated skarns and magma control of magma-genetic skarns to the formation of some skarn type deposits from North China were discussed. Believes that melt inclusions and fluid-melt inclusions-bearing mineralized skarns must be magmatic origin. Their distribution ranges and scale are widespread and very large. Distribution of some skarn deposits from North China in time and space as well as scale is controlled by magmatic skarns distributed in given regions. We hope this study will help to broaden ideas in the study of metallogenic regularity and deep prospecting and exploration for ore deposits of skarn type.

Key words North China; Skarn; Laser Raman; Melt inclusion; Fluid-melt inclusions

摘要 本文将报道中国北方主要矽卡岩型矿床矿物熔融包裹体和流体-熔融包裹体的激光拉曼分析结果。研究目的是确认这些矿化矽卡岩矿物是否含熔融包裹体和流体-熔融包裹体, 获取有关它们相态特征和相组成以及它们的分布状况(是局部的、偶然性的, 还是广泛的)的信息。文章对邯邢铁矿、蒙库铁矿和杨家杖子钼矿等9个矿床12块标本中石榴石、辉石和方解石或白云石中23个包裹体进行了共聚焦激光拉曼光谱仪分析。拉曼分析结果表明, 所研究的矽卡岩矿物均含熔融包裹体和/或流体-熔融包裹体, 它们是岩浆矽卡岩的直接证据。结合本文激光拉曼分析结果、地质背景和其他地区岩浆矽卡岩矿物包裹体测温学研究, 对所研究矽卡岩的形成机制和岩浆矽卡岩对中国北方某些矽卡岩型矿床的制约进行了讨论。认为含有熔融包裹体和/或流体-熔融包裹体的矿化矽卡岩系岩浆成因, 其分布范围广泛, 规模不小。中国北方某些矽卡岩型矿床的时空分布和规模受控于该地区分布的岩浆矽卡岩。希望本文有助于拓宽矽卡岩型矿床成矿规律研究和深部找矿勘探的思路。

关键词 中国北方; 矽卡岩; 激光拉曼分析; 熔融包裹体; 流体-熔融包裹体

中图法分类号 P611.1

* 本文受中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(GPMR201103)资助。

第一作者简介: 赵劲松, 男, 1960年生, 博士, 副研究员, 实验地球化学及矿床地球化学研究, E-mail: zhaojis@gig.ac.cn

** 通讯作者: 赵斌, 男, 1933年生, 研究员, 实验地球化学及矿床地球化学, E-mail: zhaobin13660285167@163.com

尽管作者较早报道了岩浆成因矽卡岩形成的实验证据和包裹体证据(赵斌等, 1993, 1995, 2002; Zhao and Zhao, 1996; Zhao *et al.*, 2003), 但由于缺乏对熔融包裹体和流体-熔融包裹体主要相组成的系统分析资料, 研究工作曾一度陷入困境。国外有关含矽卡岩矿物中熔融包裹体和流体-熔融包裹体的研究几乎是空白, 只有意大利等国学者对 Vesuvius 火山喷出物的矽卡岩矿物中熔融包裹体、流体-熔融包裹体和流体包裹体进行了研究。他们采用激光拉曼光谱仪和扫描电镜(带能谱)对意大利 Vesuvius 火山喷出物中包裹体的矽卡岩矿物(单斜辉石)相成分进行了分析, 主要测定了含盐熔融包裹体中的相成分。分析结果显示, 包裹体里的固相几乎不含或略含硅酸盐矿物(如云母)(Fulignati *et al.*, 2001, 2004; Lima *et al.*, 2003; Gilg *et al.*, 2001)。

国内曾用电子探针和激光拉曼测定过熔融包裹体的相成分, 分析结果证明, 熔融包裹体的固相成分主要与其寄主矿物的类似(赵劲松等, 2003, 2008)。由于电子探针和扫描电镜测定需要包裹体暴露在薄片表面, 对于矽卡岩矿物中多数为 $10\mu\text{m}$ 左右的熔融包裹体很难满足其要求。目前, 用激光拉曼光谱仪测定矿物熔融包裹体和流体-熔融包裹体相组成是最有效的手段之一, 它不仅具有无损的优点, 更重要的是它能快速而准确地测定在显微镜下选定的含气泡的熔融包裹体和流体-熔融包裹体的气相和固相组成。

1 地质背景

本研究涉及我国北方杨家杖子钼矿、寿王坟铜矿、小寺沟铜钼矿、华铜铁-铜矿、綦村铁矿、符山铁矿、松江钨-铜-锌矿、蒙库铁矿和雅满苏铁矿等九个矿床, 其中前四个矿床位于板块东部, 均属华北克拉通北缘中段的燕辽钼铜成矿带, 处于华北板块、西伯利亚板块和库拉-太平洋板块的结合带(代军治等, 2006); 綦村铁矿和符山铁矿床归属于邯邢铁矿类型, 位于中朝准地台北低洼区或者说邯邢式铁矿田处于华北大陆裂谷带之西侧, 属板内太行断块的范畴(张国军, 1985; 李黎明, 1986); 松江钨铜锌矿床处于西伯利亚板块、华北陆块和库拉-太平洋板块夹持的中间地带, 是中生代大陆边缘活动构造-岩浆带的双重构造叠合区; 蒙库铁矿大地构造位置属于西伯利亚板块阿勒泰陆缘拉张裂谷带(董连慧等, 2010; 秦克章等, 2002); 雅满苏铁矿床大地构造位置位于塔里木板块与准格尔板块缝合带中, 即处于两板块的俯冲-碰撞构造交汇处(花林宝, 2001)。各矿区地层各异, 在燕辽成矿带主要出露元古代和震旦纪地层, 其次是古生代和中生代地层, 其岩性主要为燧石白云质碳酸盐岩夹火山变质岩和角岩、片岩等。松江钨铜锌矿床附近主要有泥盆系至第三系地层分布, 大多为中酸性火山岩, 砂岩和砂砾岩, 唯有下二叠统交界屯系浅海相碳酸盐沉积。邯邢铁矿田内主要出露中奥陶纪碳酸盐岩。蒙库铁矿床和雅满苏铁矿床周边出露的地层分别为泥盆纪和石炭纪火山岩夹正常沉积岩。在塔

里木-中朝板块东部和西部的岩浆活动特点和矽卡岩的产状有明显区别, 东部的岩浆活动以燕山期中酸性侵入作用为主, 西部以华力西火山喷溢作用为主, 东部的矽卡岩产在中酸性岩体与碳酸盐岩的接触带及其附近, 西部的矽卡岩却产在火山岩中。矽卡岩主要由钙铁榴石-钙铝榴石固溶体系列的石榴石和透辉石-钙铁辉石固溶体系列的单斜辉石组成, 其次有方解石、符山石、硅灰石和晚期蚀变的绿帘石、透闪石-阳起石固溶体系列的角闪石、绿泥石、方柱石、碳酸盐矿物等。矿石矿物主要有磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿、白钨矿和磁黄铁矿等。

2 岩浆矽卡岩的矿物包裹体证据

矽卡岩矿物中熔融包裹体和流体-熔融包裹体是岩浆矽卡岩的直接证据。因此, 作者的研究重点是包裹体岩相学和包裹体组成。首先在光学显微镜下仔细观察矽卡岩矿物是否含熔融包裹体和流体-熔融包裹体, 然后对部分有代表性的熔融包裹体及流体-熔融包裹体展开激光拉曼分析。显微镜下矿物包裹体的岩相学研究要与激光拉曼分析结果互相结合, 在包裹体固相特征拉曼峰波数与其寄主矿物的相近或相同时尤为重要。

2.1 显微镜下观察到的证据

在中国北方主要矽卡岩矿床石榴石、辉石和方解石中观察到了熔融包裹体和流体-熔融包裹体, 它们在显微镜下的特征展示在图 1 中。为了把熔融包裹体与固体包裹体分开, 专门选出含气泡的熔融包裹体放在图 1 中, 熔融包裹体不一定都含气泡, 气体分布在包裹体的周边和包裹体的固相之间, 加热过程中形成气泡, 这样的熔融包裹体在显微镜下容易与矿物固体包裹体混淆, 但后者在高温热台上加温不会产生气泡。所以, 在显微镜下观察到的包裹体类型及其相态特征要得到高温热学研究或激光拉曼或电子探针等分析后才能确认。硅酸盐矿物熔融包裹体中的固相主要含硅酸盐矿物, 在方解石或白云石的熔融包裹体主要含碳酸盐矿物。在显微镜下观察包裹体时, 必须把单偏光镜下找到的包裹体在双偏光镜下检查其消光性。对于石榴石, 含钙铁榴石分子摩尔分数高的石榴石在双偏光镜下一般为全消光, 它所含的包裹体固相若是石榴石, 其消光位与寄主矿物相同; 含钙铝榴石摩尔分数高的石榴石, 在双偏光镜下基本上非均匀消光, 它们所含的包裹体固相若是石榴石, 其光学性质与寄主矿物相同。图 1 中的石榴石都是含钙铁榴石摩尔分数比较高的石榴石, 它们所含包裹体固相与寄主矿物消光性相同。包裹体中的固相若为方解石或其他硅酸盐矿物(如果不是等轴的均质矿物), 都具有斜消光的特征。方解石在双偏光镜下为斜消光, 并且具有高级白干涉色。

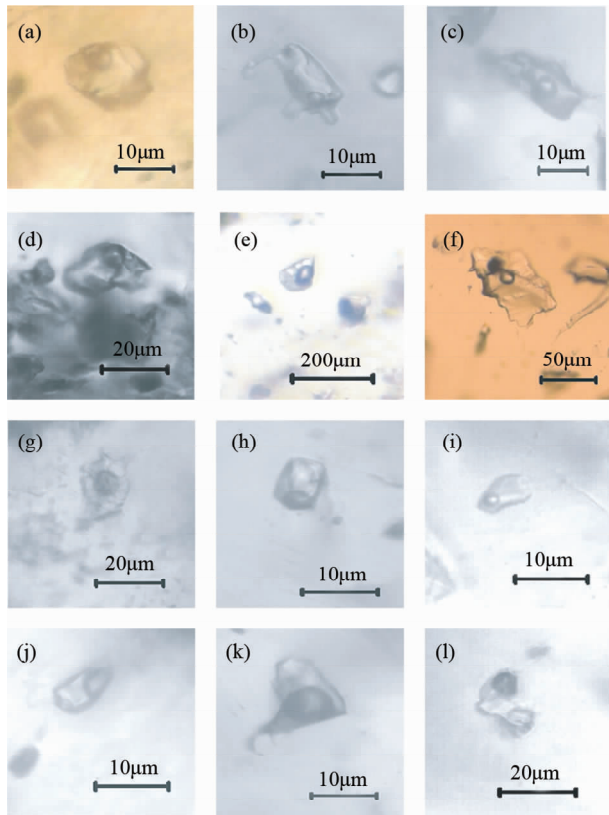


图1 中国北方主要砂卡岩型矿床矿物熔融包裹体和流体-熔融包裹体的显微照片

(a,b)新疆蒙库铁矿床石榴石中熔融包裹体(标本编号为78-84);(c,d)新疆满苏铁矿床石榴石中熔融包裹体(标本编号为78-248和78-262);(e)邯邢铁矿田中綦村铁矿床石榴石中熔融包裹体(标本编号为80-22);(f)邯邢铁矿田中符山铁矿床石榴石中熔融包裹体(标本编号为Fs);(g)寿王坟铜矿床石榴石中熔融包裹体(标本编号为83-218);(h,i)分别为小寺沟铜钼矿床石榴石中熔融包裹体与流体包裹体(标本编号为83-239);(j)杨家杖子钼矿床石榴石中熔融包裹体(标本编号为83-365);(k)松江钨-锌-铜矿床石榴石中熔融包裹体(标本编号为83-563);(l)华铜铁铜矿床辉石中熔融包裹体(标本编号为83-824)

Fig. 1 Micrographs of melt inclusions and fluid-melt inclusions in minerals from main deposits of skarn type, North China

2.2 包裹体的物质组成研究

2.2.1 分析方法和分析结果

本文的包裹体物质组成研究采用激光拉曼原位分析方法,样品测定在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室的英国 Renishaw RM-1000 型显微激光拉曼仪进行。分析条件为:激光光源:氩离子激光器(波长514.5nm);激光器输出功率:15mV;狭缝宽度:25 μ m;曝光时间:30s;叠加次数:3次。

作者曾对包裹体中的气泡和固体相进行过多次测试,并

在中国地质大学(武汉)的其它实验室 DXR 激光显微共焦拉曼光谱仪和 HORIBA JY LABRAM HR800 型高分辨紫外-可见-近红外拉曼光谱仪上检查。分析前需先在包裹体薄片中找到所测包裹体,将每个测点的激光打在欲测部位,尤其是对包裹体内的固相测试,激光轰击固体相中央,远离包裹体边部。除了綦村铁矿(80-22)和杨家杖子钼矿床(83-390)标本中的包裹体含 CH_4 和 C_3H_8 外,均未测出气相,推测为气体密度低,其含量低于仪器检测极限;检测包裹体的固相均与寄主矿物相似或相同。对邯邢铁矿、蒙库铁矿和杨家杖子钼矿等9个矿床12块标本中石榴石、辉石和方解石中的23个包裹体做了激光拉曼分析。包裹体的相态特征和激光拉曼谱分别表示在图2、图3、图4、图5和表1中。经过激光拉曼测试确认包裹体含 $\text{H}_2\text{O} + \text{V}$ 和含固相的包裹体称为流体-熔融包裹体。如果包裹体只含气相和固相而不含 H_2O ,这种类型的包裹体是典型的熔融包裹体。熔融包裹体的形状各异,大小一般为几微米至十几微米(见图1、图2、图3、图4和图5)。

2.2.2 激光拉曼分析简述

2.2.2.1 蒙库铁矿床(标本编号:78-84)

该铁矿床石榴石的包裹体有三种类型的相态特征(见图2和表1):第一种类型为含 $\text{Ca} + \text{H}_2\text{O} + \text{V}$ 的三相流体-熔融包裹体(见表1中78-84-2号包裹体);这里的V用拉曼仪器未测出气相,但包裹体中确有气体,可能是高温平衡的水蒸气,在常温下内压太低,激光拉曼无法测定。以下V的情况相同;第二种类型为含 $\text{Ga} + \text{Ca} + \text{V}$ 的三相熔融包裹体(表1中78-84-3号包裹体);第三种类型为 $\text{Ca} + \text{V}$ 的两相熔融包裹体(表1中78-84-4号包裹体)。它们的相态特征和激光拉曼谱线分别表示在图2中。石榴石的主要拉曼特征峰波数(cm^{-1})为:寄主矿物石榴石为879、362;包裹体中的石榴石主要拉曼峰波数介于877和880之间与362和364之间,与寄主矿物的拉曼峰波数大致相近,表示包裹体中确有石榴石存在,其拉曼峰的波数具有包裹体中的石榴石与寄主矿物石榴石叠加的特征(以下情况类似,不再说明)。方解石或白云石的拉曼特征峰波数为1080-1093,水为3439,都与它们的标准激光拉曼曲线相似。

2.2.2.2 雅满苏铁矿床(标本编号:78-246和78-248)

雅满苏铁矿床的包裹体不如蒙库铁矿床发育,根据测试结果(图2和表1),石榴石中的包裹体为 $\text{Ga} + \text{Py} + \text{V}$ 和 $\text{Ca} + \text{V}$ 多相熔融包裹体(图2和表1)。

2.2.2.3 邯邢式铁矿田

2.2.2.3.1 綦村铁矿床(标本编号:80-22)

綦村铁矿床中的包裹体气泡明显(图1和图3)。80-22-01和80-22-02号熔融包裹体含有 $\text{Ga} + \text{CH}_4 + \text{C}_3\text{H}_8$,特别富含气体。80-22-03号为 $\text{Ga} + \text{H}_2\text{O}$ 的流体-熔融包裹体。80-22-02和80-22-03号包裹体的相态特征及拉曼谱线见图3。

2.2.2.3.2 符山铁矿床(标本编号:Fs)

从图1、图3和表1看出,该样品中石榴石为红色透明晶

表1 北方矽卡岩型矿床矿物包裹体的激光拉曼光谱分析结果

Table 1 Results of laser Raman analyses for inclusions in minerals from skarn-type deposits distributed in North China

矿床名称	标本编号	包裹体的寄主矿物	被测试的包裹体编号	测试结果(包裹体的相组成)
蒙库铁矿床	78-84	石榴石	78-84-2	Cal + H ₂ O + V
			78-84-3	Ga + Cal + V
			78-84-4	Cal + V
雅满苏铁矿床	78-246 78-248	石榴石	78-246a	Ga + Py + V
			78-248a	Cal + V
綦村铁矿床	80-22	石榴石	80-22-01 in vapor	C ₃ H ₈ + CH ₄
			80-22-02 In vapor	Ga + CH ₄ + C ₃ H ₈
			80-22-03	Ga + H ₂ O + V
符山铁矿床	Fs	石榴石	Fs	Ga + Cal 或 Dol + V
寿王坟铁铜矿床	83-218	辉石	83-218a	Py + V
		石榴石	83-218b	Ga + H ₂ O + V
小寺沟铜钼矿床	83-236	辉石	83-236a	Py + V
		石榴石	83-236b	Ga + V
		方解石	83-236c	Cal + HCO ₃ ⁻
杨家杖子钼矿床	83-371 83-390	石榴石	83-371a	Ga + H ₂ O + V
			83-390-01	Ga + Cal + CH ₄ + C ₃ H ₈
松江钨锌铜矿床	83-487 83-596	石榴石	83-487a	Ga + V
			83-596a	Ga + Cal + V
			83-596b	Ga + V
华铜铁铜矿床	83-824	辉石	83-824a	Py + V
		白云石	83-824b	Dol + H ₂ O + V
		辉石	83-824c	Cal + H ₂ O + V
		辉石	83-824d	Py + Cal + H ₂ O + V

注: Cal-方解石; Dol-白云石; Ga-石榴石; Py-辉石; H₂O-液相 H₂O 或盐水溶液; V-气体, 因包裹体有气泡, 包裹体内压低而无法检测到, 推测应该有气体, 故在未测到气体的包裹体上标注 V

体, 包裹体多而大, 有很明显的气泡, 但没有测出气体成分。该包裹体为 Ga + Dol 或 Cal + V 的三相熔融包裹体。

2.2.2.4 寿王坟铁铜矿床(标本编号:83-218)

包裹体寄主矿物是辉石或石榴石, 分别含 Py + V 和 Ga + H₂O + V 两相熔融包裹体和三相流体-熔融包裹体(图3和表1)。

2.2.2.5 小寺沟矽卡岩-斑岩型铜钼矿床(标本编号:83-236)

从表1看出, 小寺沟矽卡岩-斑岩型铜钼矿床的辉石含 Py + V。石榴石含 Ga + V(寄主矿物石榴石拉曼特征峰波数 (cm⁻¹) 为 877, 包裹体里的固相拉曼峰波数为 878) 和白云石或方解石(寄主矿物碳酸盐矿物的拉曼特征峰波数为 1089, 包裹体中的白云石或方解石也为 1089), 可能为含白云石的 Dol + V 的两相熔融包裹体(图3), 清楚地显示熔融裹体组成取决于寄主矿物。

2.2.2.6 杨家杖子钼矿床(标本编号:83-371 和 83-390)

杨家杖子钼矿床 83-371 包裹体的石榴石为含 Ga + H₂O + V 三相流体-熔融包裹体, 83-390 包裹体为含 Ga + Cal + CH₄ + C₃H₈ 的多相熔融包裹体。83-390 号包裹体富含 CH₄ 和 C₃H₈(见表1)。

2.2.2.7 松江钨-锌-铜矿床(标本编号:83-487 和 83-596)

松江钨锌铜矿床 83-487 标本石榴石里的包裹体为含 Ga

+ V 两相熔融包裹体, 而 83-596 标本石榴石里的包裹体为含 Ga + Cal + V 三相熔融包裹体(见表1)。

2.2.2.8 华铜铁-铜矿床(标本编号:83-824)

华铜铁-铜矿床的辉石含 Py + Cal + H₂O + V 和 Cal + H₂O + V 流体-熔融包裹体与 Py + V 熔融包裹体; 样品中方解石含 Cal + H₂O + V 的三相流体-熔融包裹体。这说明形成岩浆矽卡岩时, 钙总是呈过饱和状态。前已述及, 83-824b 包裹体里的碳酸盐矿物可能为白云石(见表1)。

3 讨论

激光拉曼分析过程中, 每个测点都有寄主矿物的谱线出现。当熔融包裹体中的固相成分(例如方解石)与寄主矿物(例如石榴石或辉石)成分不同时, 比较容易确认熔融包裹体中固相矿物的归属。如果测点所测熔融包裹体中的固体矿物与寄主矿物相同, 则该测点的拉曼谱线是它们二者的重叠。在这种情况下, 包裹体的矿物拉曼谱线峰位可以与寄主矿物的拉曼谱线峰位有一些小的差异, 也可以完全相同, 但在允许范围内变化。此时, 包裹体的岩相学特征是确定包裹体内矿物组成的重要参考。只有当包裹体中无任何物质存在时, 激光拉曼分析结果才是寄主矿物的拉曼谱线。前已述及, 在测定包裹体内部固相时, 激光轰击处必须是固体中央,

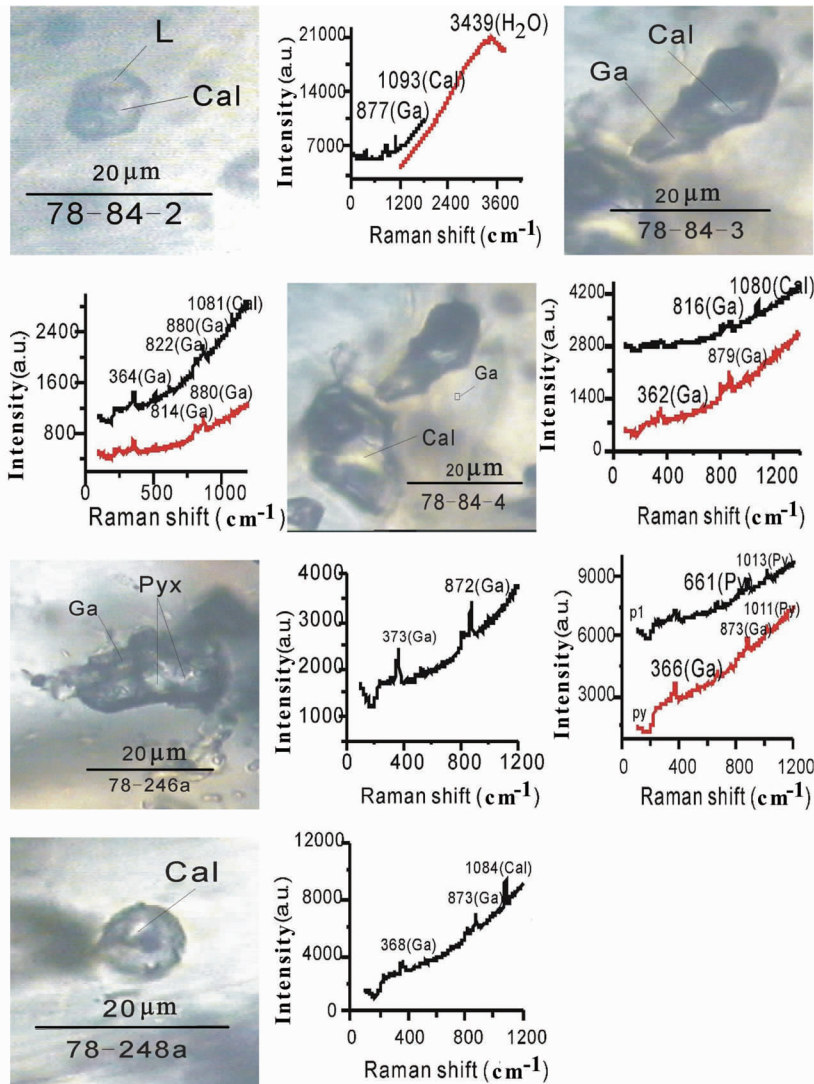


图2 蒙库铁矿床(包裹体78-84-2、-3和-4)和雅满苏铁矿床(包裹体78-246a和78-248a)矽卡岩矿物中包裹体激光拉曼图谱

照片右侧为该照片中包裹体的激光拉曼曲线(下同);Cal-方解石(包裹体78-84-2的1093 cm^{-1} 拉曼峰值可能为白云石);Ga-石榴石;Py(或Pyx)-辉石;L-H₂O. 缩写下同

Fig. 2 Laser Raman lines for the inclusions in skarn minerals from Mengku iron ore deposit (inclusions 78-84-2, -3 and -4) and Yamansu iron ore deposit (inclusions 78-246a and 78-248a)

远离包裹体的边部,避免了寄主矿物对包裹体内部固体相测试结果的影响。在激光拉曼分析过程中,用激光拉曼分析熔融包裹体内的固体矿物组成比较有效。因此,包裹体内部固相拉曼特征峰波数与其寄主矿物的相近或相似性,表示它们属同一族矿物。基于这种认识,我们认为,所研究的我国北方含矿矽卡岩矿床中的石榴石、辉石和方解石均含熔融包裹体和流体-熔融包裹体,而且主要含熔融包裹体,流体-熔融包裹体次之(23个包裹体中只有7个包裹体测到了H₂O,约占所测包裹体总数的1/3)。除了綦村铁矿床和杨家杖子钼矿床中的矽卡岩矿物熔融包裹体富含CH₄与C₃H₈外,其他矿床矽卡岩矿物中的气泡分别用中国地质大学(武汉)三个实

验室的激光拉曼分析仪器测试,均未测出气相成分,其原因已做阐述。这些熔融包裹体和流体-熔融包裹体的相态特征与我们曾经研究过的长江中下游的铁铜(金)矿床和石碌铁矿床矽卡岩矿物里的包裹体类似(赵斌等,1995,1999,2002;Zhao and Zhao,1996;Zhao *et al.*,2003;赵劲松和Newberry,1996;赵劲松等,2000,2008),具有可比性。包裹体中的固相成分取决于寄主矿物成分,这是岩浆成因矽卡岩的独有特点,与热液交代形成的矽卡岩矿物不同。这一看法与长江中下游矽卡岩矿床里的矿物包裹体电子探针分析结果和海南岛石碌铁矿床石榴石中熔融包裹体的拉曼分析结果得出的结论一致(赵劲松等,2003,2008)。因此可以进一

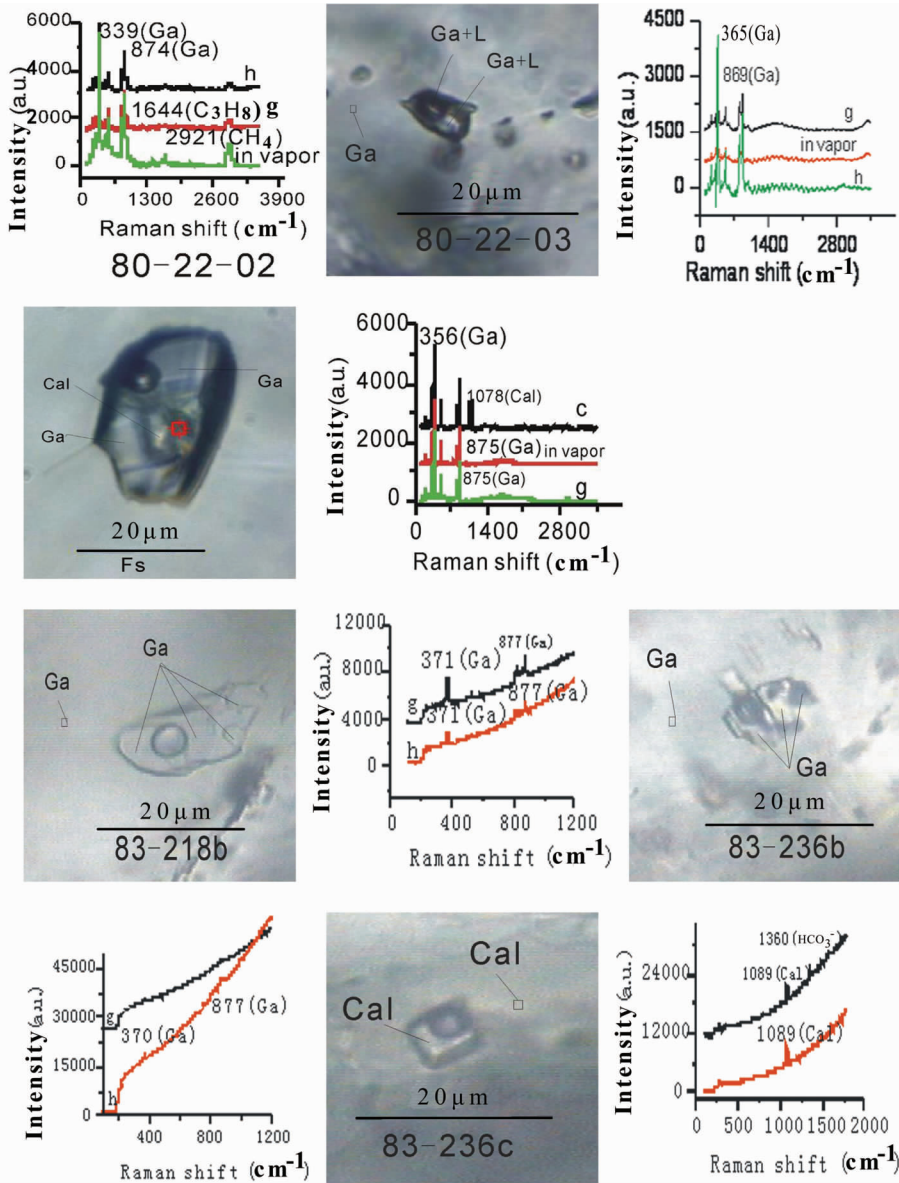


图3 碁村铁矿床(包裹体 80-22-02 和 80-22-03)、符山铁矿床(包裹体 Fs)、寿王坟铜矿床(包裹体 83-218b)和小寺沟铜-钼矿床(包裹体 83-236b 和 83-236c)矽卡岩矿物中包裹体激光拉曼图谱

80-22-02 拉曼谱线的包裹体未保存照片;c-方解石的拉曼谱线;g-石榴石的拉曼谱线;h-包裹体寄主矿物的拉曼曲线;包裹体 83-236c 的 1089cm^{-1} 拉曼峰值可能为白云石

Fig. 3 Laser Raman lines for the inclusions in skarn minerals from Qicun iron ore deposit (inclusions 80-22-02 and 80-22-03), Shouwangfen copper ore deposit (inclusions 83-218b) and Xiaosigou copper-molybdenum deposit (inclusions 83-236b and 83-236c)

步认为,我国北方含有熔融包裹体和流体-熔融包裹体的矽卡岩普遍分布,规模不小。根据本文作者和其他作者的测温学研究推测,所研究的熔融包裹体均一温度大概在 $900 \sim 1150^\circ\text{C}$ 之间,平均为 1030°C (赵斌等, 1995, 1999, 2002; 赵劲松和 Newberry, 1996; 林新多, 1999),与中酸性岩体副矿物里熔融包裹体的均一温度范围相当(李兆麟, 1986);流体-熔融包裹体的均一温度大约在 $750 \sim 890^\circ\text{C}$ 之间(赵斌等, 2002; Zhao *et al.*, 2003)。

研究地区的大地构造背景为矽卡岩岩浆形成、上升、侵位、演化和成岩成矿提供了良好条件。板块俯冲、板内裂谷、板内拗陷和板块边缘活动带等都能诱发包括矽卡岩岩浆在内的所有岩浆的形成和上升,为矿床形成提供了成矿物质。铝硅酸盐岩浆活动为矽卡岩岩浆的产生提供了热源和物质基础,不同时代的碳酸盐沉积为矽卡岩岩浆的形成准备了条件。矽卡岩岩浆可能有深成和浅成之分。深成矽卡岩岩浆是下地壳中酸性岩浆同化沉积碳酸盐地层的产物,而浅成的

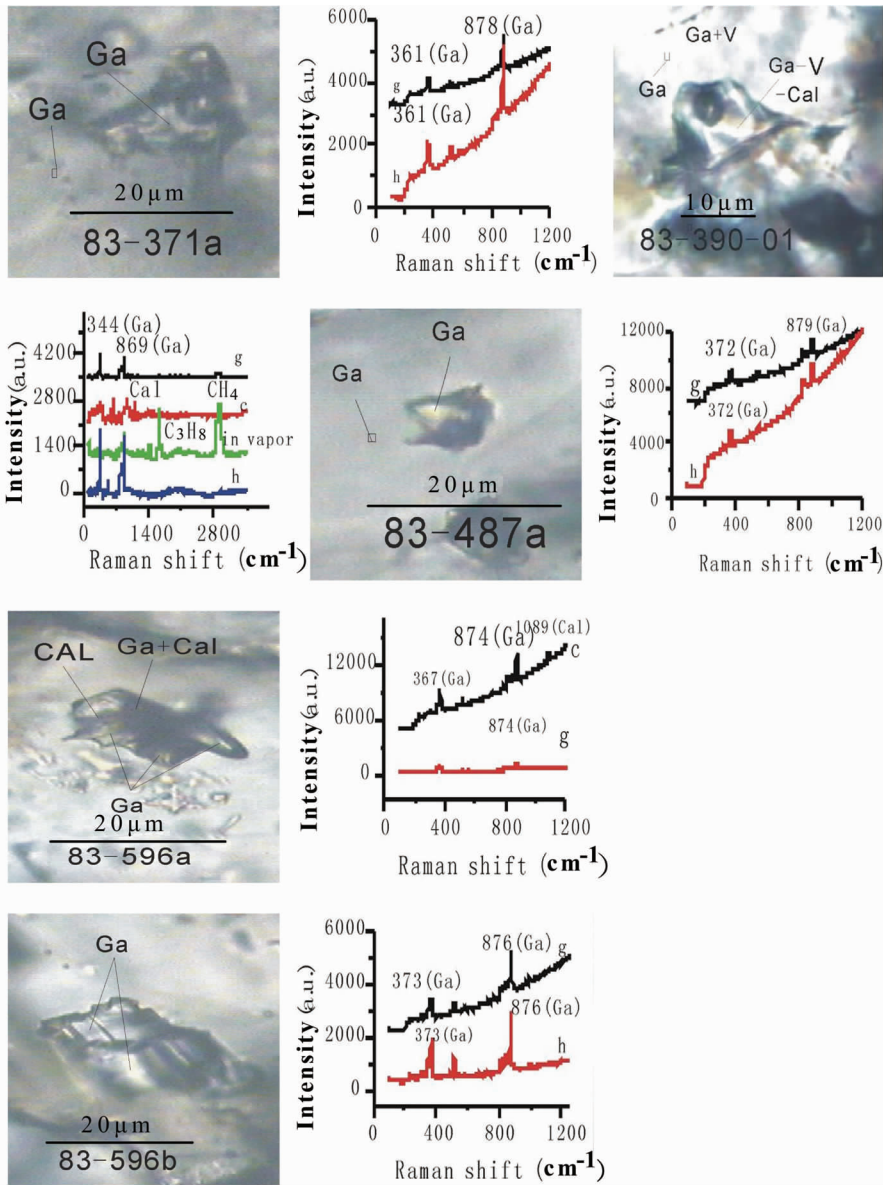


图4 杨家杖子钼矿(包裹体 83-371a 和 83-390-01)与松江钨-锌-铜矿床(包裹体 83-487a 和 83-596a、b)矽卡岩矿物中包裹体激光拉曼图谱

Pyx2-包裹体第2测点的辉石

Fig. 4 Laser Raman lines for the inclusions in skarn minerals from Yangjiazhangzi molybdenum deposit (inclusions 83-371a and 83-390-01) and Songjiang tungsten-zinc-copper deposit (inclusions 83-487a, 83-596a and 83-596b)

矽卡岩岩浆可能是由侵入岩浆同化地表附近碳酸盐地层而成。在 0.1 ~ 1GPa 和 820 ~ 990℃ 的条件下,不含水的陆壳岩石可以发生局部熔融 (Vielzeuf and Montel, 1994), 这与中国长江中下游 Fe、Fe-Cu (Au)、Au (Cu) 矿床和柿竹园超大型 W-Sn-Mo-Bi 矿床熔融包裹体与流体-熔融包裹体的均匀温度十分相近 (赵斌等, 1995, 1999, 2002; Zhao *et al.*, 2003; 赵劲松和 Newberry, 1996)。李兆麟 (2001) 曾提出,在地壳变质深熔温压条件下,壳源岩石部分熔融或接近全熔,形成花岗质岩浆,原先存在于地壳中的成矿元素也富集在这种岩浆及其结晶产物中,形成有经济价值的矿床的论述是有科学根

据的。如果变质深熔作用形成的岩浆同化深部的碳酸盐或碳酸岩,也可以生成矽卡岩岩浆。这与幔源或壳源成因岩浆同化碳酸盐岩形成矽卡岩岩浆的机制相似,某些矽卡岩成矿作用也可能与李兆麟 (2001) 提出的变质深熔成岩成矿机制雷同。无论是在地壳深部还是在其浅部,在有挥发分参加或挥发分缺失的高温条件下,铝硅酸盐岩浆同化碳酸盐地层或幔源碳酸岩是形成矽卡岩岩浆的先决条件。新生的矽卡岩岩浆在岩浆房或上升途中由液态不混溶而同铝硅酸盐岩浆分离,可以形成独立的矽卡岩岩浆 (赵斌等, 2002)。在地壳深处形成的矽卡岩岩浆沿深大断裂上升才能到达浅部定位,

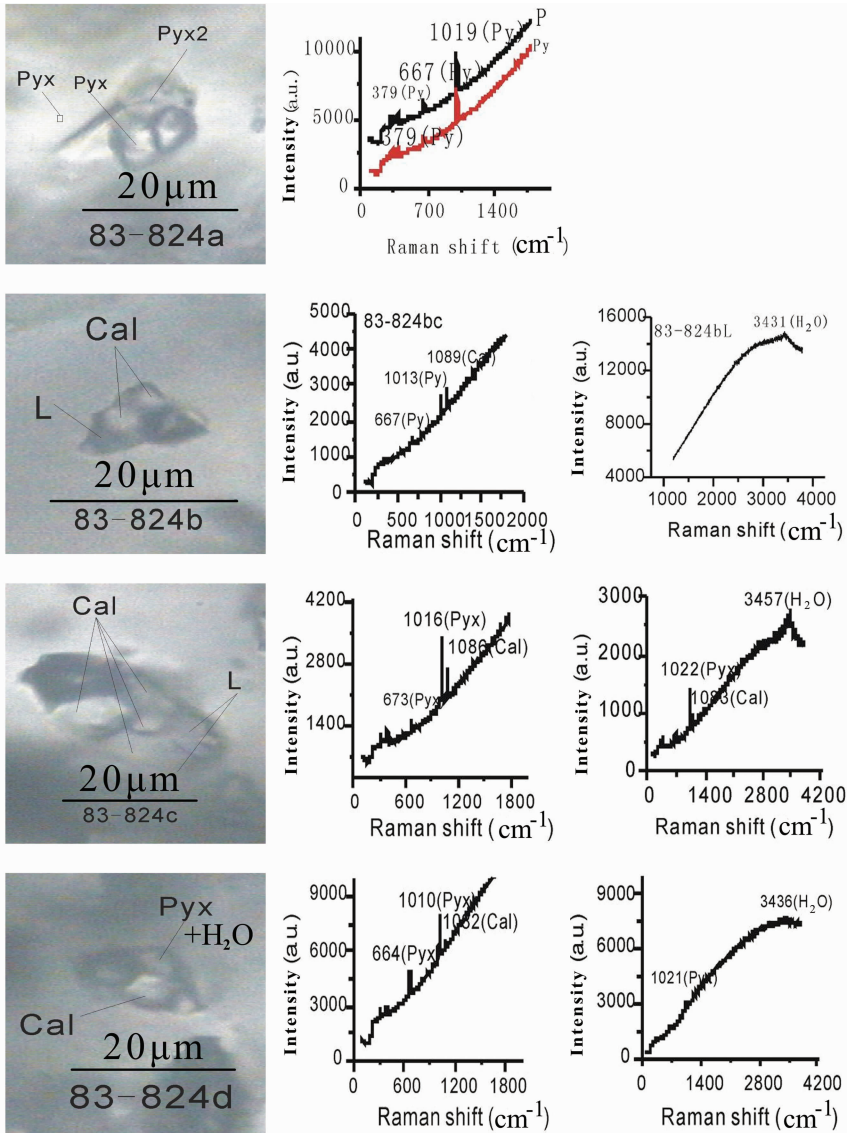


图5 华铜铁铜矿床(包裹体 83-824a、b、c、d)矽卡岩矿物中包裹体激光拉曼图谱

包裹体 83-824b 的 1089cm^{-1} 拉曼峰值可能为白云石

Fig. 5 Laser Raman lines for the inclusions in skarn minerals from Huatong iron-copper ore deposit (inclusions 83-824a, b, c, d)

在地壳浅处同化作用产生的矽卡岩岩浆无需长距离的运移。矽卡岩岩浆既可以伴随同化碳酸盐岩或幔源碳酸岩的铝硅酸盐岩浆一起从地壳深处上涌,也可以分道扬镳。由于壳源或幔源铝硅酸盐岩浆同化碳酸盐或碳酸岩的作用,所以岩浆成因矽卡岩具有壳源、壳幔混合成因(赵斌和赵劲松, 2010^①)或幔源成因的特点。岩浆成因矽卡岩的这三种形成机制得到了高温高压实验资料的证实(赵斌等, 1993, 2007^②)。从地壳深部上升到地壳浅部的矽卡岩岩浆形成的矽卡岩,其 Sr 和 Nd 同位素特征与在地表观察到的中性岩体的不同,在地壳浅处同化作用产生的矽卡岩岩浆形成的矽卡岩,它们的 Sr 和 Nd 同位素特征与在地表观察到的中性岩岩浆与碳酸盐地层的相符(赵斌和赵劲松, 2010)。上述研究结果显示,所研究的含矿矽卡岩的形成经历过硅酸盐岩

浆的同化、新生熔融体的分异、不混溶、结晶和富集沉淀的演化过程,具有岩浆岩的特征。这一发现再次证明,在自然界,除了交代成因矽卡岩外,还有其他成因的矽卡岩;传统的单一交代作用不再是主宰矽卡岩和矽卡岩型矿床形成的唯一理论,矽卡岩和矽卡岩型矿床是多成因的(涂光炽, 1977^③),

① 赵斌,赵劲松. 2010. 大冶-城门山矽卡岩中的熔融包裹体和 Sr-Nd 的同位素地球化学研究. 第十六届全国包裹体及地质流体学术研讨会论文集, 2-3

② 赵斌,饶冰,王年生等. 2007. 水-岩作用形成的矽卡岩矿物中熔融包裹体初步研究. 地质流体和流体包裹体研究国际学术会议暨第十五届全国流体包裹体会议(International Conference on Geofluid and Fluid Inclusions)论文集, 222-223

③ 涂光炽. 1977. 在富铁矿会议上的讲话

2003; Zhao, 1984; 赵斌, 1989)。在多成因矽卡岩中, 岩浆矽卡岩还没有得到应有的重视, 今后应予以加强。

无论在中国长江中下游还是在北方, 矽卡岩型矿床的时空分布和规模都受矽卡岩岩浆影响, 具有经济价值成矿元素都基本上富集在矽卡岩岩浆及其结晶产物中, 因而矽卡岩的规模又制约了矿床的金属储量。激光拉曼分析结果显示, 石榴石或辉石中的包裹体除了含石榴石和辉石外, 主要含方解石或白云石, 其中有含方解石或白云石的熔融包裹体和流体-熔融包裹体, 这意味着在矿物缺陷捕获较均匀的矽卡岩岩浆后, 由于温度和压力下降矽卡岩岩浆不混溶形成了矽卡岩矿物和与之共存的碳酸盐矿物。在硅酸盐岩浆同化碳酸盐岩时总是产生过饱和的碳酸盐熔浆。作者认为, 这一现象与在野外地质产状十分吻合。在大冶铁矿床岩浆矽卡岩、壳源碳酸岩与岩浆成因铁矿体在空间上共存。结合石碌铁矿石榴石的熔融包裹体含赤铁矿、石榴石和方解石(赵劲松等, 2008)的研究结果, 作者之一赵斌提出, 岩浆矽卡岩、壳源成因碳酸岩和岩浆成因铁矿为同一岩浆体系不混溶的产物。成矿物质主要来源于同化生成矽卡岩岩浆的原岩(包括幔源、壳源和壳幔混合成因的岩石)。

4 结论

用激光拉曼分析结果证明, 在中国北方主要矽卡岩型矿床的矽卡岩矿物里广泛分布有熔融包裹体和流体-熔融包裹体, 其固相组成主要与寄主矿物相似或相同, 次为碳酸盐矿物, 气相主要有 CH_4 和 C_3H_8 (仅少量样品有)。在流体-熔融包裹体中, 液相为 H_2O 或盐水溶液。这些包裹体相态特征与长江中下游地区铜铁(金)矿床及海南岛石碌铁矿床石榴石中熔融包裹体相似, 应归属岩浆矽卡岩。

致谢 在激光拉曼分析过程中曾得到中国地质大学(武汉)马强、平先权、李瑞年、鲁江姑和范寿龙等博士的热情帮助, 我所余亮亮研究生协助整理拉曼图谱; 中山大学李兆麟教授对修改稿进行了认真审阅, 并提出了宝贵的修改意见, 本文采纳了他的建议; 审稿人认真审阅并且提出了中肯的意见, 他们的意见和建议对提高本文的质量起到了重要作用; 在此一并致谢。

References

Dai JZ, Mao JW, Yang FQ *et al.* 2006. Geological characteristics and geodynamic background of molybdenum (copper) deposits along Yanshan-Liaoning metallogenic belt on northern margin of North China block. *Mineral Deposits*, 25(5): 598–612 (in Chinese with English abstract)

Dong LH, Qu X, Zhu ZX *et al.* 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of Xinjiang, China. *Xinjiang Geology*, 28(4): 351–357 (in Chinese with English abstract)

Fulignati P, Kamenetsky VS, Marianelli P *et al.* 2001. Melt inclusion

record of immiscibility between silicate, hydrosaline, and carbonate melts: Applications to skarn genesis at Mount Vesuvius. *Geology*, 29(11): 1043–1046

Fulignati P, Marianelli P, Santacroce R *et al.* 2004. Probing the Vesuvius magma chamber-host rock interface through xenoliths. *Geological Magazine*, 141(4): 417–428

Gilg HA, Lima A, Somma R *et al.* 2001. Isotope geochemistry and fluid inclusion study of skarns from Vesuvius. *Mineralogy and Petrology*, 73(1–3): 145–176

Hua LB. 2001. Element geochemistry subarea and ore-finding direction of metallogenic district, Yamansu-Shaquanzi, eastern Tianshan, Xinjiang. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 21(2): 99–103 (in Chinese with English abstract)

Li LM. 1986. The control factors of metallogenetic structures in the Hanxing-type iron deposits. *Geology and Prospecting*, 22(4): 1–11 (in Chinese)

Li ZL. 1986. New method for diagenetic temperature determination of the inclusions in accessory minerals from magmatic rocks and its application. *Science in China (Series D)*, 16(12): 1327–1336 (in Chinese)

Li ZL. 2001. Some thoughts on relationships between metamorphic anatexis and petrogenesis-mineralization. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 29–37 (in Chinese with English abstract)

Lima A, Danyushevsky LV, De Vivo B *et al.* 2003. A model for the evolution of the Mt. Somma-Vesuvius magmatic system based on fluid and melt inclusion investigations. In: De Vivo B and Bodnar RJ (eds.). *Melt Inclusions in Volcanic Systems: Methods, Applications and Problems*. *Development in Volcanology*, (5): 227–249

Lin XD. 1999. *Magmatic-Hydrothermal Transitional Type Deposit*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 139 (in Chinese)

Qin KZ, Sun S, Li JL *et al.* 2002. Division of six tectonic stages of major metallic deposits in northern Xinjiang and its implications. *Mineral Deposits*, 21(Suppl.): 203–206 (in Chinese with English abstract)

Tu GC. 2003. *Mineralization and Prospecting*. Shijiazhuang: Hebei Education Press, 1–454 (in Chinese)

Vielzeuf D and Montel JM. 1994. Partial melting of metagreywackes. Part I. fluid-absent experiments and phase relationships. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(4): 375–393

Zhang GJ. 1985. An analysis of metallogenetic structures in the Hanxing-type iron deposits of the North China Diwa region. *Geotectonica et Metallogenia*, 9(2): 99–111 (in Chinese)

Zhao B. 1984. On the multi-genesis of skarns and their relations to metallogenesis. In: *Academia Sinica (ed.)*. *Developments in Geoscience Contribution to 27th International Geological Congress*. Beijing: Science Press, 331–342

Zhao B. 1989. *Main Skarn and Skarn Deposits in China*. Beijing: Science Press, 1–342 (in Chinese)

Zhao B, Zhao JS, Zhang CZ *et al.* 1993. The evidence from experimental data for magma-genetic skarn. *Chinese Science Bulletin*, 38(21): 1986–1989 (in Chinese)

Zhao B, Li YS and Zhao JS. 1995. The evidence from inclusions for magma-genetic skarn. *Geochimica*, 24(2): 198–200 (in Chinese with English abstract)

Zhao B and Zhao JS. 1996. Main geological and geochemical characteristics of massive calcareous skarns from Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. In: Tu GC and Zhao ZH (eds.). *Progress in Geochemistry*. *Contributions to 30th International Geological Congress*. Guangzhou: Zhongshan University Press, 26–52

Zhao B, Zhao JS and Li ZL. 1999. Geological and geochemical implications of inclusions in minerals from Shizhuyuan ore deposits. In: *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (ed.)*. *Sustainable Development of Resources and Environment*. Beijing: Science Press, 62–68 (in Chinese)

Zhao B, Zhao JS, Li ZL *et al.* 2003. Characteristics of melt inclusions in skarn minerals from Fe, Cu(Au) and Au(Cu) ore deposits in the

region from Daye to Jiujiang. *Science in China (Series D)*, 46(5): 481–497

- Zhao JS and Newberry RJ. 1996. Novel knowledge on the origin and mineralization of skarns from Shizhuyuan. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(4): 442–449 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JS, Zhao B and Li ZL. 2000. Finding of melt inclusion in skarn mineral from Daye iron deposit and its geologic-geochemical significance. *Geochimica*, 29(5): 500–503 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JS, Zhao B, Zhang CZ *et al.* 2003. Compositions of melt inclusions in garnet and pyroxene from skarn deposits distributed in the area from Daye to Chengmenshan. *Geochimica*, 32(6): 540–550 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JS, Xia B, Qiu XL *et al.* 2008. Finding of melt inclusion in garnet from skarn of Shilu iron deposit, Hainan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 149–160 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 代军治, 毛景文, 杨富全等. 2006. 华北地台北缘燕辽钼(铜)成矿带矿床地质特征及动力学背景. *矿床地质*, 25(5): 598–612
- 董连慧, 屈迅, 朱志新等. 2010. 新疆大地构造演化与成矿. *新疆地质*, 28(4): 351–357
- 花林宝. 2001. 新疆东天山雅满苏-沙泉子成矿区元素地球化学分区及找矿方向. *桂林工学院学报*, 21(2): 99–103
- 李黎明. 1986. 论邯邢式铁矿成矿构造控制因素. *地质与勘探*, 22(4): 1–11
- 李兆麟. 1986. 岩浆岩副矿物中包裹体成岩温度测定新方法及其应用. *中国科学(B辑)*, 16(12): 1327–1336
- 李兆麟. 2001. 关于变质深熔作用与成岩成矿关系的思考. *地学前缘*, 8(3): 29–37
- 林新多. 1999. 岩浆-热液过渡型矿床. 武汉: 中国地质大学出版社,

139

- 秦克章, 孙枢, 李继亮等. 2002. 北疆古生代矿床组合的六大构造阶段划分及其意义. *矿床地质*, 21(增刊): 203–206
- 涂光炽. 2003. 成矿与找矿. 石家庄: 河北教育出版社, 1–454
- 张国军. 1985. 华北地洼区邯邢式铁矿成矿构造分析. *大地构造与成矿学*, 9(2): 99–111
- 赵斌. 1989. 中国主要夕卡岩及夕卡岩型矿床. 北京: 科学出版社, 1–342
- 赵斌, 赵劲松, 张重泽等. 1993. 岩浆成因夕卡岩的实验证据. *科学通报*, 38(21): 1986–1989
- 赵斌, 李院生, 赵劲松. 1995. 岩浆成因夕卡岩的包裹体体证据. *地球化学*, 24(2): 198–200
- 赵斌, 赵劲松, 李兆麟. 1999. 柿竹园矿床矿物包裹体的地质地球化学意义. 见: 中国科学院地球化学研究所编. 资源环境与可持续发展. 北京: 科学出版社, 62–68
- 赵斌, 赵劲松, 李兆麟等. 2002. 大冶-九江地区 Fe, Cu(Au) 和 Au(Cu) 矿床夕卡岩矿物里的熔融包裹体特征. *中国科学(D辑)*, 32(7): 550–561
- 赵劲松, Newberry RJ. 1996. 对柿竹园矽卡岩成因及其成矿作用的新认识. *矿物学报*, 16(4): 442–449
- 赵劲松, 赵斌, 李兆麟. 2000. 大冶铁矿床夕卡岩矿物中熔融包裹体的发现及其地质地球化学意义. *地球化学*, 29(5): 500–503
- 赵劲松, 赵斌, 张重泽等. 2003. 大冶-城门山夕卡岩矿床石榴子石和辉石中熔融包裹体成分研究. *地球化学*, 32(6): 540–550
- 赵劲松, 夏斌, 丘学林等. 2008. 海南岛石碌矽卡岩铁矿石中石榴子石的熔融包裹体及其意义. *岩石学报*, 24(1): 149–160